DOI:10.19562/j.chinasae.qcgc.2010.12.012

汽 车 工 程
Automotive Engineering
2010年(第32卷)第12期 2010(Vol.32) No.12

2010220

基于轴距预瞄的半主动悬架模糊神经网络控制*

贝绍轶[1], 袁传义[1], 陈 龙[2], 张兰春[1]
(1. 江苏技术师范学院机械与汽车工程学院, 常州 213001; 2. 江苏大学汽车与交通工程学院, 镇江 212013)

[摘要] 应用模糊控制和神经网络控制理论, 构建了1/2车辆的半主动悬架模型, 设计了基于轴距预瞄的半主动悬架模糊神经网络控制系统。对前轮半主动悬架采用以对应处车身垂向加速度为目标的模糊控制, 对后轮半主动悬架采用轴距预瞄模糊控制, 并利用神经网络来调整模糊控制器的控制规则和隶属度函数。在不同车速下对所建的控制系统分别进行了白噪声和路面脉冲输入的仿真。结果表明, 与传统的被动系统相比, 轴距预瞄模糊神经网络控制的半主动悬架系统能有效降低车辆振动; 与模糊控制的半主动悬架系统相比, 质心垂向加速度和后轮对应处车身加速度均有显著减小, 较好地改善了车辆的行驶平顺性。

关键词: 半主动悬架; 轴距预瞄; 模糊神经网络控制

Fuzzy Neural Network Control of Semi-active Suspension Based on Wheelbase Preview

Bei Shaoyi[1], Yuan Chuanyi[1], Chen Long[2] & Zhang Lanchun[1]
1. School of Mechanical and Automobile Engineering, Jiangsu Teachers University of Technology, Changzhou 213001;
2. School of Automobile and Traffic Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013

[Abstract] By applying theories of fuzzy control and neural network control, a semi-active suspension model for half vehicle is constructed and a fuzzy neural network control system for semi-active suspension is designed based on wheelbase preview. Fuzzy control is applied to front wheel semi-active suspension with the vertical acceleration at the point on car body vertically corresponding to front wheel center as control objective, while the fuzzy control based on wheelbase preview is applied to rear semi-active suspension, and neural network is adopted to adjust the control rules and membership function of fuzzy controller. Simulations with white noise and road pulse inputs are carried out respectively at different vehicle speeds. The results show that the semi-active suspension system with wheelbase preview-based fuzzy neural network control can effectively suppress vehicle vibration compared to traditional passive suspension and the vertical accelerations at both the mass center of sprung mass and the point on car body vertically corresponding to rear wheel center are significantly reduced compared to fuzzy controlled semi-active suspension, well improving the ride comfort of vehicle.

Keywords: semi-active suspension; wheelbase preview; fuzzy neural network control

前言

预瞄控制是近年来开始研究的一种新的悬架系统控制方法[1-4], 可对悬架系统进行实时控制。车辆预瞄控制分为车前预瞄和轴距预瞄两种。车前预瞄须在车辆前方安装路面位移传感器, 成本相对较高; 轴距预瞄无须使用路面位移传感器, 因此是一种更经济而切实可行的方法。轴距预瞄主要是根据车辆的结构特点, 假定后轮的位移输入与前轮处基本相同, 仅存在一个时间上的滞后, 因而可利用前轮的路面位移输入信号作为后轮未来的路面输入信息。

文献[5]和文献[6]在1/2车辆模型的基础上建立了轴距预瞄综合模型, 而且采用最优控制理论

---

* 国家自然科学基金(50875112)资助。

原稿收到日期为2009年12月14日, 修改稿收到日期为2010年2月4日。

进行控制,需要较多可测的状态变量;而本文中则主要基于模糊控制和神经网络控制理论,结合车辆轴距预瞄的特点,设计基于轴距预瞄的半主动悬架模糊神经网络控制系统。对前轮半主动悬架采用对应处车身垂向加速度为控制目标的模糊控制,对后轮半主动悬架采用轴距预瞄模糊控制,利用神经网络来调整模糊控制器的控制规则和隶属度函数,分别对被动悬架系统、模糊控制系统和轴距预瞄模糊神经网络控制系统进行仿真分析。为进一步验证半主动悬架预瞄控制的效果,还进行了路面脉冲输入的仿真,对比研究不同控制方法对车辆平顺性的控制效果。

1 系统模型的建立

1.1 半主动悬架 1/2车辆模型

轴距预瞄控制模型是在 1/2车辆模型基础上建立起来的,如图 1所示。

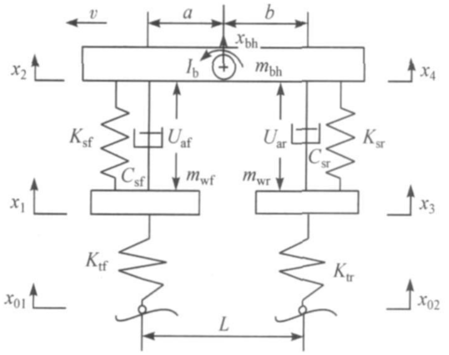


图 1 1/2车辆模型

在小俯仰角范围内

$$\begin{cases} x_2 = x_{bh} - a\theta_b \\ x_4 = x_{bh} + b\theta_b \end{cases} \tag{1}$$

1/2车辆模型的动力学方程为

$$\ddot{x}_1 m_{wf} = K_{tf}(x_{01} - x_1) - [U_{af} + K_{sf}(x_1 - x_2) + C_{sf}(\dot{x}_1 - \dot{x}_2)] \tag{2}$$

$$\ddot{x}_2 = (1/m_{bh} + a^2/I_b)[U_{af} + K_{sf}(x_1 - x_2) + C_{sf}(\dot{x}_1 - \dot{x}_2)] + (1/m_{bh} - ab/I_b)[U_{ar} + K_{sr}(x_3 - x_4) + C_{sr}(\dot{x}_3 - \dot{x}_4)] \tag{3}$$

$$\ddot{x}_3 m_{wr} = K_{tr}(x_{02} - x_3) - [U_{ar} + K_{sr}(x_3 - x_4) + C_{sr}(\dot{x}_3 - \dot{x}_4)] \tag{4}$$

$$\ddot{x}_4 = (1/m_{bh} - ab/I_b)[U_{af} + K_{sf}(x_1 - x_2) + C_{sf}(\dot{x}_1 - \dot{x}_2)] + (1/m_{bh} + b^2/I_b)[U_{ar} + K_{sr}(x_3 - x_4) + C_{sr}(\dot{x}_3 - \dot{x}_4)] \tag{5}$$

式中:x_{bh}为车身(实指簧载质量)质心垂向位移;x_1为前轮胎垂向位移;x_2为前轮胎对应处车身垂向位移;x_3为后轮胎垂向位移;x_4为后轮胎对应处车身垂向位移;$\dot{x}_i$、$\ddot{x}_i$($i=1,2,3,4$)为对应处的垂向速度和垂向加速度;I_b为 1/2车身(实指簧载质量)俯仰转动惯量;a为质心与前轮轴线在地面投影的距离;b为质心与后轮轴线在地面投影的距离;m_{bh}为 1/2车身质量;m_{wf}、m_{wr}为前、后非悬挂质量;K_{sf}、K_{sr}为前、后悬架刚度;C_{sf}、C_{sr}为前、后悬架阻尼系数;K_{tf}、K_{tr}为前、后轮胎刚度;x_{01}、x_{02}为前、后路面位移;U_{af}、U_{ar}为前、后半主动悬架作动器作用力。

1.2 路面输入模型的建立

选用的路面输入模型由一白噪声通过成形滤波器产生[7]:

$$\dot{x}_{01} = -2\pi f_0 x_{01} + 2\pi\sqrt{G_0 v}\, w(t) \tag{6}$$

由于后轮处的输入与前轮处相比仅存在一个时间滞后(轴距/车速),因此,后轮的输入为

$$\dot{x}_{02} = \dot{x}_{01}(t - \tau)$$

式中:v为车速;G_0为路面不平度系数;$w(t)$为均值为零的 Gauss白噪声;f_0为下截止频率;τ为前后轮激励时间差,$\tau = (a + b)/v$。

1.3 汽车运动的状态方程

汽车运动的预瞄控制状态方程为

$$\dot{x} = Ax + Bu + Ew \tag{7}$$

状态变量为

$$x = [\dot{x}_1 \quad \dot{x}_2 \quad \dot{x}_3 \quad \dot{x}_4 \quad x_1 \quad x_2 \quad x_3 \quad x_4]^T \tag{8}$$

控制输入为

$$u = [U_{af} \quad U_{ar}]^T \tag{9}$$

高斯白噪声输入为

$$w = [x_{01} \quad x_{02}]^T \tag{10}$$

且有

$$\begin{cases} Q_1 = (1/m_{bh} + a^2/I_b) \\ Q_2 = (1/m_{bh} - ab/I_b) \\ Q_3 = (1/m_{bh} + b^2/I_b) \end{cases}$$

$$B = \begin{bmatrix} -1/m_{wf} & 0 \\ Q_1 & Q_2 \\ 0 & -1/m_{wr} \\ Q_2 & Q_3 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad E = \begin{bmatrix} K_{tf}/m_{wf} & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & K_{tr}/m_{wr} \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$A=\begin{bmatrix} -C_{sf}/m_{wf} & C_{sf}/m_{wf} & 0 & 0 & -(K_{tf}+K_{sf})/m_{wf} & K_{sf}/m_{wf} & 0 & 0 \\ Q_1C_{sf} & -Q_1C_{sf} & Q_2C_{sr} & -Q_2C_{sr} & Q_1K_{sf} & -Q_1K_{sf} & Q_2K_{sr} & -Q_2K_{sr} \\ 0 & 0 & -C_{sr}/m_{wr} & C_{sr}/m_{wr} & 0 & 0 & -(K_{tr}+K_{sr})/m_{wr} & K_{sr}/m_{wr} \\ Q_2C_{sf} & -Q_2C_{sf} & Q_3C_{sr} & -Q_3C_{sr} & Q_2K_{sf} & -Q_2K_{sf} & Q_3K_{sr} & -Q_3K_{sr} \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

2　基于轴距预瞄的模糊神经网络控制系统

为了对后悬架进行轴距预瞄控制，必须知道车辆后轮将要经过的路面激励信息，由式(2)可推导出前轮感受到的路面激励信息为

$$x_{01}=\frac{m_{wf}\ddot{x}_1+U_{af}+K_{sf}(\dot{x}_1-\dot{x}_2)+C_{sf}(x_1-x_2)}{K_{tf}}+x_1 \tag{11}$$

由式(11)得到的 x_{01} 与实际前轮感受到的激励存在一个时间差 Δt，但该时间差很短($\Delta t\approx 0$)，即由式(11)得到的 x_{01} 就是前轮感受到的路面信息。

基于模糊控制和神经网络控制理论，结合车辆轴距预瞄的特点，设计基于轴距预瞄的半主动悬架模糊神经网络控制系统，如图 2所示。

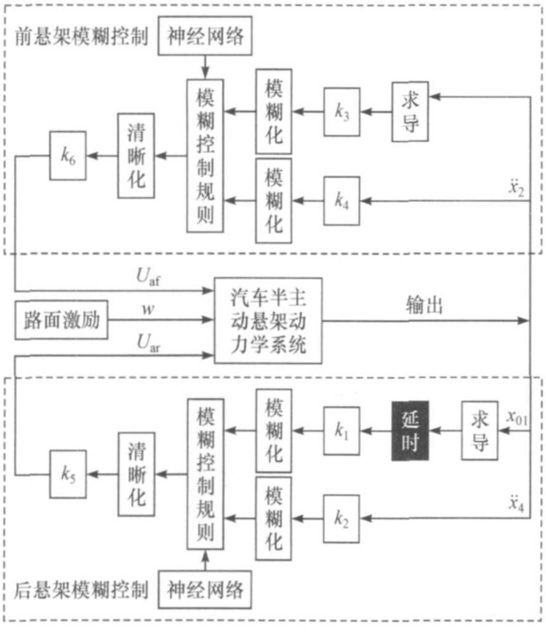


图 2　基于轴距预瞄的半主动悬架模糊神经网络控制系统

对于前悬架的模糊控制，其输入为前轮胎对应处的车身垂向加速度 $\ddot{x}_2$ 及其变化率，输出为前悬架作动器控制力 U_{af}；对于后悬架的模糊控制，其输入为路面输入速度 $\dot{x}_{01}$ 和后轮胎对应处的车身垂向加速度 $\ddot{x}_4$，输出为后悬架作动器控制力 U_{ar}；w 为路面激励信号，即车轮的白噪声输入；k_1、k_2、k_3、k_4 为模糊控制输入的尺度变换因子，k_5、k_6 为半主动悬架控制力的尺度变换因子。

3　仿真结果与分析

所选试验用车的主要参数见表 1。

表 1　某车型悬架系统参数

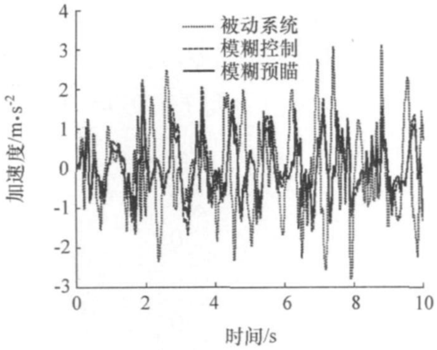
参数	数值	参数	数值
a/mm	1 444.4	K_{sf}/kN·m^{-1}	130
b/mm	1 305.6	K_{sr}/kN·m^{-1}	85
m_{bh}/kg	803.7	C_{sf}/N·s·m^{-1}	3 040
I_b/kg·m^2	3 128.1	C_{sr}/N·s·m^{-1}	3 040
m_{wf}/kg	90	K_{tf}/kN·m^{-1}	405
m_{wr}/kg	115	K_{tr}/kN·m^{-1}	405

对汽车以 72 km/h的车速驶过不平度系数 G_0 为每个循环 256×10^{-6} m^3 的路面的工况进行仿真，分别对被动悬架、模糊控制半主动悬架和轴距预瞄模糊神经网络控制的半主动悬架的仿真结果进行比较，如图 3和表 2所示。

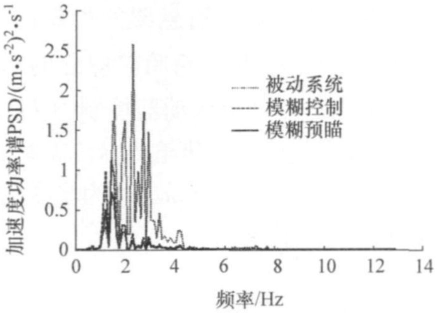
表 2　仿真结果比较(车速为 72 km/h)

	后轮处车身加速度/m·s^{-2}		质心加速度/m·s^{-2}	
	峰值	标准差	峰值	标准差
被动系统	3.096	1.075	3.871	1.388
模糊控制	2.254	0.746	2.743	0.996
模糊预瞄	1.781	0.578	2.176	0.801

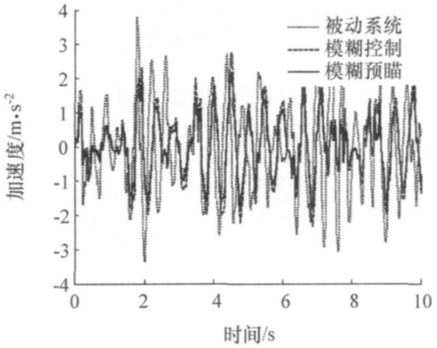
结果表明：基于轴距预瞄的模糊神经网络控制与被动悬架和模糊控制的半主动悬架系统相比，在时域内，预瞄控制后的质心加速度峰值和标准差比被动系统分别减少了 43.8%和 42.3%，比模糊控制



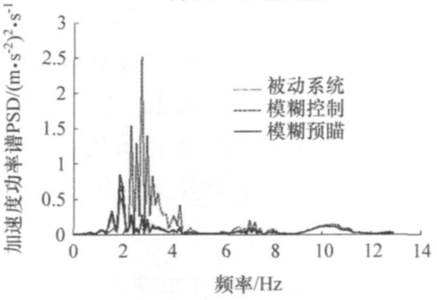
(a) 后轮处车身加速度



(b) 后轮处车身加速度功率谱密度



(c) 质心垂向加速度

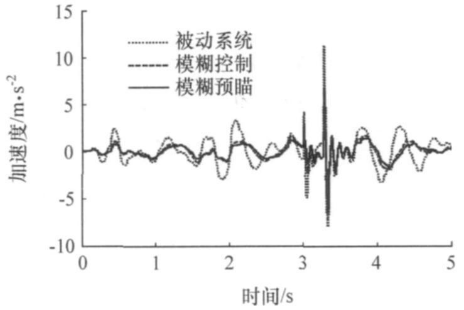


(d) 质心加速度功率谱密度

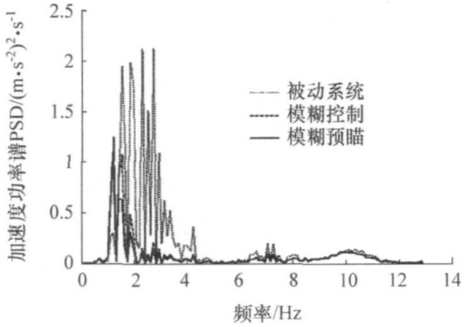
图 3 仿真结果 (车速为 72 km/h)

的悬架系统分别减少了 20.7%和 19.6%。后轮对应处车身加速度和质心垂向加速度均有明显减小，较好改善了悬架系统适应道路的性能，有效抑制了车辆的振动，提高了汽车的行驶平顺性。

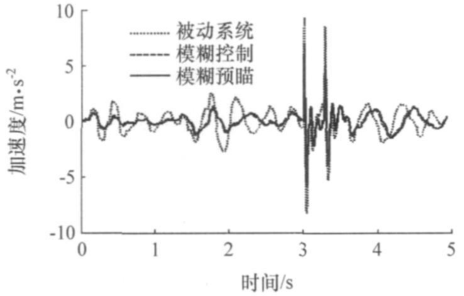
为进一步研究特殊工况下半主动悬架预瞄控制的效果，进行了车速为 40 km/h的路面脉冲输入，输入函数为 $x_0 = \delta(t)$，仿真结果如图 4和表 3所示。



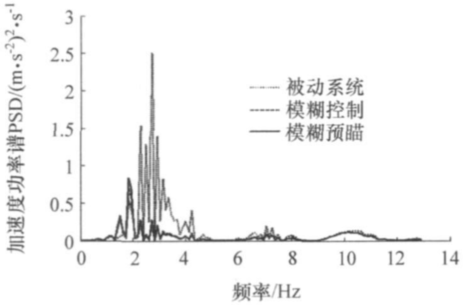
(a) 后轮处车身加速度



(b) 后轮处车身加速度功率谱密度



(c) 质心垂向加速度



(d) 质心加速度功率谱密度

图 4 仿真结果 (车速为 40 km/h)

表 3 仿真结果比较 (车速为 40 km/h)

	后轮处车身加速度 /$\mathrm{m \cdot s^{-2}}$		质心加速度 /$\mathrm{m \cdot s^{-2}}$	
	峰值	标准差	峰值	标准差
被动系统	11.290	2.043	9.311	1.998
模糊控制	6.875	1.187	6.847	1.211
模糊预瞄	6.564	1.043	4.915	1.020

(下转第 1082页)

动悬架对路面的损伤[11]。同时表明 J评价指标能真实地反映道路友好性。

3 结论

将 RBF网络与自适应控制相结合，能有效控制汽车半主动悬架的道路友好性，使控制器应对复杂控制问题的能力大大增强。

车身质心垂向加速度均方根值的减小和轮胎动态载荷的降低充分说明了 RBF网络自适应控制策略在提高车辆半主动悬架系统道路友好性的同时，兼顾了车辆的平顺性，体现了 RBF网络自适应控制的优点。

参考文献

[1] 徐斌，史艳彬，王国栋. 悬架系统非线性元件对平顺性和道路友好性的影响[J]. 车辆与动力技术，2005(1)：46－51.

[2] 任为群，金国栋. 可减小道路破坏性的车辆主动悬架设计[J]. 中国机械工程，2004，22(15)：2059－2063.

[3] 余卓平，黄锡朋，张洪欣. 减轻重型汽车对道路的损伤汽车悬架优化设计[J]. 中国公路学报，1994，7(3)：83－87.

[4] 严天一，刘大维，等. 基于混合控制策略的半主动悬架道路友好性[J]. 系统仿真学报，2007，19(8)：3808－3812.

[5] Lai C Y, Liao W H. Vibration Control of a Suspension System via a Magnetorheological Fluid Damper[J]. Journal of Vibration and Control, 2002, 8(4): 525－547.

[6] Guo D L, Hu H Y, Yi J Q. Neural Network Control for a Semi-active Vehicle Suspension with a Magnetorheological Damper[J]. J of Vibration and Control, 2004, 10(3): 461－471.

[8] 刘永强，杨绍普，申永军. 基于磁流变阻尼器的汽车悬架半主动相对控制[J]. 振动与冲击，2008，27(2)：154－156，161.

[9] 赵亮，文桂林，韩旭，等. 基于磁流变阻尼器的车辆半主动悬架最优控制的研究[J]. 汽车工程，2008，30(4)：341－344.

[10] 董小闵，余淼，廖昌荣，等. 汽车磁流变半主动悬架自适应模糊控制研究[J]. 中国公路学报，2006，19(2)：111－115.

[11] 严天一，刘大维，陈焕明，等. 基于主动悬架系统车辆的道路友好性[J]. 机械工程学报，2007，43(2)：163－167.

(上接第1070页)

结果表明：模糊预瞄控制和模糊控制的半主动悬架系统与被动悬架系统相比，质心垂向加速度和后轮处的车身加速度均有所降低，在 0～10Hz频域范围内，其功率谱密度也有较大幅度衰减。模糊预瞄控制的后轮处车身加速度峰值和标准差比被动系统分别减少了 41.86%和 48.95%，比模糊控制的半主动悬架系统分别下降了 4.52%和 12.13%；质心垂向加速度峰值和标准差比被动系统分别减少了 47.21%和 48.95%，比模糊控制的半主动悬架系统分别下降了 28.22%和 15.77%。说明模糊预瞄控制较好地改善了悬架系统适应道路的性能。

另外，轴距预瞄模糊控制半主动悬架在车速高时的悬架减振效果较差，原因在于：其控制效果受硬件系统响应时滞的影响，预瞄时间应小于控制系统硬件响应时间，否则轴距预瞄控制将减弱甚至失去作用。因此，在轴距一定的条件下，轴距预瞄时间随车速的增加而减小，预瞄控制效果减弱。

4 结论

基于模糊控制理论，利用轴距预瞄技术，在建立的 1/2车辆半主动悬架模型基础上，设计了前轮模糊控制和后轮轴距预瞄模糊神经网络控制的半主动悬架控制系统。仿真结果表明，与被动悬架系统及模糊控制的半主动悬架系统相比，无论是经过白噪声输入的路面，还是脉冲输入的特殊路面，模糊轴距预瞄控制后的半主动悬架均能有效降低质心垂向加速度和后轮处的车身加速度，有效降低了车辆的振动，改善了汽车的行驶平顺性。

参考文献

[1] 刘少军，李艳. 基于 1/2车辆模型的主动悬架预见控制方法研究[J]. 信息与控制，2000，29(1)：6－13.

[2] Thompson A G, Pearce C E M. Direct Computation of the Performance Index for an Optimally Controlled Active Suspension with Preview Applied to a Half-car Model[J]. Vehicle System Dynamics, 2001, 35: 121－137.

[3] 张玉春，王良曦，丛华. 汽车主动悬挂控制的研究现状和未来挑战[J]. 控制理论与应用，2004，21(1)：139－144.

[4] Thompson A G, Pearce C E M. Performance Index for a Preview Active Suspension Applied to a Quarter-car Model[J]. Vehicle System Dynamics, 2001, 35: 55－66.

[5] 秦民，董波，马天飞，等. 基于轴间预瞄的主动悬架研究[J]. 汽车工程，2004，26(2)：193－196.

[6] 喻凡，郭孔辉. 结合卡尔曼滤波器的车辆主动悬架轴距预瞄控制研究[J]. 汽车工程，1999，21(2)：72－80.

[7] Yu Fan, Corolla D A. An Optimal Self-tuning Controller for an Active Suspension[J]. Vehicle System Dynamics, 1998, 29: 51－65.